한국에너지공학회지(2001), 제10권 제3호
Energy Engg. J(2001), Vol. 10, No. 3, pp. 188~194

중잔사유 가스화 복합발전 사이클의 성능 및 환경배출 해석

이 찬* · 윤용승**
*수원대학교 환경청정기술연구센터/기계공학과
**고등기술연구원 플랜트엔지니어링 센터

Analysis on the Performance and the Emission of the Integrated Gasification Combined Cycle Using Heavy Residue Oil

Chan Lee* and Yongseung Yun**
**Center for Environmental & Clean Technology/Department of Mechanical Engineering, University of Suwon, Suwon, Korea*
***Plant Engineering Center, Institute for Advanced Engineering, Suwon, Korea*

요 약

정유공장으로부터 발생하는 중잔사유를 이용하는 가스화 복합발전 플랜트에 대한 공정모사를 수행하였다. 가스화 복합사이클의 발전계통을 모델링하기 위해, 본 연구는 MS7001FA 가스터빈이 공기분리장치와 연계되어 있고, 공기분리장치를 위한 공기 추출과 공기분리장치로 부터의 질소회석이 이루어진다고 가정하였다. 가스터빈의 폐열은 삼중압력의 폐열회수 증기발생장치로부터 회수하였다. 가스터빈의 합성가스 연료는 중잔사유가 Shell 가스화 및 Sulfinol-SCOT-Claus 공정을 거쳐 발생되는 것으로 가정하였다. 공정 최적화 결과로부터, 가스화 복합사이클의 효율이, 질소 희석이 없는 경우와 있는 경우에 대해, 공기추출비 20% 또는 40~60%에서 가장 우수했다. 그리고, 연소기의 질소희석은 NOx 저감에 매우 바람직하고 현저한 효과를 가져오나, 반면에 가스터빈의 운전조건을 써지 조건에 가깝게 이동시킴을 알 수 있었다.

Abstract — The process simulations are made on the IGCC power plant using heavy residue oil from refinery process. In order to model combined power block of IGCC, the present study employs the gas turbine of MS7001FA model integrated with ASU (Air Separation Unit), and considers the air extraction from gas turbine and the combustor dilution by returned nitrogen from ASU. The exhaust gas energy of gas turbine is recovered through the bottoming cycle with triple pressure HRSG (Heat Recovery Steam Generator). Clean syngas fuel of the gas turbine is assumed to be produced through Shell gasification of Visbreaker residue oil and Sulfinol-SCOT-Claus gas cleanup processes. The process optimization results show that the best efficiency of IGCC plant is achieved at 20% air extraction condition in the case without nitrogen dilution of gas turbine combustor and at the 40% with nitrogen dilution. Nitrogen dilution of combustor has very favorable and remarkable effect in reducing NOx emission level, while shifting the operation point of gas turbine to near surge point.

1. 서 론

정유공장에서 원유 정제 과정 후 남는 찌거기인 중잔사유(heavy residue oil)는 원유의 정제과정을 거치며 남게되는 유황 및 중금속 성분등을 포함하는 일종의 산업폐기물로서, 점차적으로 강화되고 있는 환경 규제 및 기준으로 인해, 국내외의 많은 정유회사들이 이러한 중잔사유의 효율적 처리에 많은 관심을 집중하고 있다. 외국의 경우 미국, 일본 및 이태리 등의 기술 선진국들을 중심으로 중잔사유 처리방안 확립 및 그에 따른 기술개발에 1990년대 이후로 적극적인 노력을 기울이고 있으며, 최근 들어서는 국내의 정유회사들도 중잔사유 처리방안에 대한 연구를 활성화하고 있는 추세이다.

중잔사유의 단기적인 처리방안으로, 대부분의 정유회

사들은 중잔사유를 주로 도로포장을 위한 아스팔트의 원료나 저급의 석유연료와의 혼합등에 사용하고 있다. 그러나, 아스팔트의 가격이 떨어지거나 계절적으로 아스팔트의 수요가 내려가는 동절기의 경우에는, 정유회사들은 잉여 중잔사유의 처리에 매우 어려움을 겪고있다.

그러므로, 이러한 단기적 처리 방안의 단점과 전세계적으로 강화되는 각국의 산업폐기물 처리 정책을 감안하면, 정유공장의 산업 폐기물인 중잔사유에 대한 처리 방법도 지금과 같은 소극적인 자세에서 벗어나 좀더 적극적이고 환경친화적인 중장기적 대안을 모색할 필요가 있다.

중잔사유를 처리하는 중장기적 방안 중에서도 가장 관심을 끄는 기술이 중잔사유를 가스화하여 정제한후 복합발전소의 연료로 사용하여 전기를 얻고 동시에 정유공장에 활용되는 수소 원료도 생하는 가스화 복합사이클(IGCC : Integrated Gasification Combined Cycle)이다. 이러한 기술은 에너지를 많이 소비하는 정유산업의 특성상 중잔사유를 활용하여 전기를 자체 생산, 공급받는다는 잇점을 가지며, 또한 중잔사유로 부터 생산 가능한 수소는 정유공장의 수소첨가분해(hydrocracking), 수소첨가탈황(hydrodesulfurization)공정에도 매우 유용하게 사용될 수 있는 부산물이다[1][2]. 이러한 이유로, 미국, 일본 및 이태리 등과 같은 기술선진국에서는 중잔사유를 이용한 IGCC 발전소를 다수 건설하여 실증 운전 또는 상업 운전중이며, 국가적으로도 산업 폐기물을 환경친화적 대체에너지로서 변환하여 사용한다는 취지에서 적극적인 장려 및 지원을 아끼지 않고 있다. 최근 들어서, 국내 정유회사들도 IGCC 도입을 위한 타당성 연구 및 경제성 분석을 수행하고 있다[2].

그러므로, 본 연구는 중잔사유 가스화 연료를 이용하는 IGCC 발전소의 공정 설계를 수행하였다. 본 연구에서는 IGCC 구성 공정으로 중잔사유의 가스화, 가스정제 공정과 가스화된 연료의 복합발전 공정을 고려하였다. 또한 본 연구에서 제안된 IGCC 공정을 바탕으로, ASU 연계 설계 개념 및 설계 변수에 따른 IGCC 발전계통의 효율, 출력, 안정성 및 NOx 배출량을 평가하였으며, 최적의 공정설계 개념 및 기준을 제시하였다. 더 나아가, 서로 다른 중잔사유를 사용하는 가스화 복합사이클의 모사결과를 비교, 검토하였다.

2. 공정 설계 및 전산 모사 방법

Fig. 1은 중잔사유를 가스화하여 활용하기 위한 전형적인 IGCC 공정의 구성도를 보여주고 있다. 그림에서 보여지듯이, 정유공장의 중잔사유는 산소와 반응하여 조생가스(raw syngas)를 생성하고, 가스중의 비산재(fly ash)와 산성가스 성분(H_2S, COS)을 제거한 후 가열되어 가스터빈 연료로 사용된다. 가스터빈은 가스 연료를 태워 전기를 생산하고, 가스터빈의 배기가스 폐열은 폐열회수장치(HRSG)에서 증기를 생산하여 증기터빈을 돌려 전기를 추가적으로 생산한다.

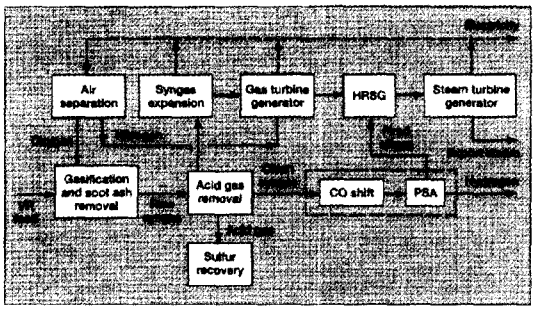


Fig. 1. Schematic diagram of heavy residue oil IGCC power plant.

그러므로, 본 연구에서는 중잔사유의 가스화 공정으로는 상용화된 공정인 Texaco 또는 Shell 공정 중 순수 산소를 산화제로 사용하는 Shell 가스화 공정을 고려하였고, 중잔사유/산소의 비율은 1.0으로 가스화 온도는 1300°C로 설정하였다. 이러한 가스화 운전 조건은 중잔사유 가스화에 대한 성능 모사를 통해 얻어진 최적의 조건으로서[4], 이 조건에서 최상의 냉가스효율(cold gas efficiency)과 탄소전환율(carbon conversion)을 얻을 수 있다. 그리고 이러한 중잔사유 가스화 과정은 열역학적으로는 Gibb's free energy 최소화 과정으로 다루어 질 수 있다.

또한 본 연구에서는 가스화 후속 공정인 가스 정제공정으로는 비산재 제거를 위한 고온의 집진공정과 가스내 황 성분 제거를 위한 Sulfinol-SCOT-Claus 연계공정을 사용하였다[5]. Sulfinol 공정은 가스 중의 산성가스를 흡수하는 공정이고, Claus-SCOT 공정은 산성가스 중의 황성분 분리공정이다. 이중 Sulfinol 공정은 생성가스로부터 산성가스(H_2S, COS)를 화학적으로 흡착, 제거하는 공정으로, 산성가스를 포함한 용매는 재생기로 유입되어 산성가스와 분리된다. 분리된 산성가스는 Claus 공정으로 유입되며, Claus 공정에서는 일련의 산화/환원 반응을 거쳐 원소형태의 황을 생성하고, Claus 공정에서 반응하지 않고 남은 산성가스는 SCOT 공정에서 미량의 정제된 가스와 혼합된 후 촉매 반응에 의해 가수분해 되어 황화수소를 생성한다. 그리고 생성된 황화수소는 다시 Claus 공정으로 재순환된다[5].

앞서의 가스화 및 가스정제 관련 화학 공정설계 및 모사에 대한 이론은 참고문헌[4][5]에 잘 기술되어 있으며, 본 연구에서는 ASPEN Plus 코드를 이용하여 계산된 석탄가스 예측결과를 GateCycle 코드를 이용한 복합발전 계

Table 1. Ultimate analysis of visbreaker residue and butane asphalt.

Ultimate analysis (wt %)	Visbreaker residue	Butane asphalt
Carbon	85.27	84.37
Hydrogen	10.08	9.67
Nitrogen	0.30	0.52
Sulfur	4.00	5.01
Oxygen	0.20	0.35
Ash	0.15	0.08

Table 2. Composition and heating value of clean syngas fuel.

Composition (Vol %)	Visbreaker residue	Butane asphalt
H_2	45.50	44.80
CO	50.28	50.98
CO_2	2.25	2.17
H_2O	0.19	0.19
CH_4	0.50	0.52
N_2	0.40	0.47
Ar	0.88	0.87
LHV(kJ/kg)	15729.8	15608.4

통 모사의 입력 값들로 사용하였다.

본 연구에서 사용한 중잔사유인 Visbreaker residue와 Butane asphalt는 원유 정제과정 중의 visbreaking 이나 C_4/C_5 desasphalting 공정 에서 발생되며[4], 이에 대한 원소분석 결과가 Table 1에, 그리고 가스화 및 산성가스 제거공정을 거친 후의 연료 가스의 조성과 발열량이 Table 2에 각각 나타나 있다[4]. 중잔사유는 대부분의 경우 탄소와 수소가 주성분이고, 가스화 된 경우 H_2/CO의 비가 약 90% 가량 되어 석탄을 가스화한 연료에 비해 H_2/CO 비가 약 2배 이상이다. 이러한 이유로, Table 2에서 보여지듯이, 중잔사유 가스는 석탄 가스에 비해 발열량도 약 20~30% 가량 더 높은 특성을 가진다.

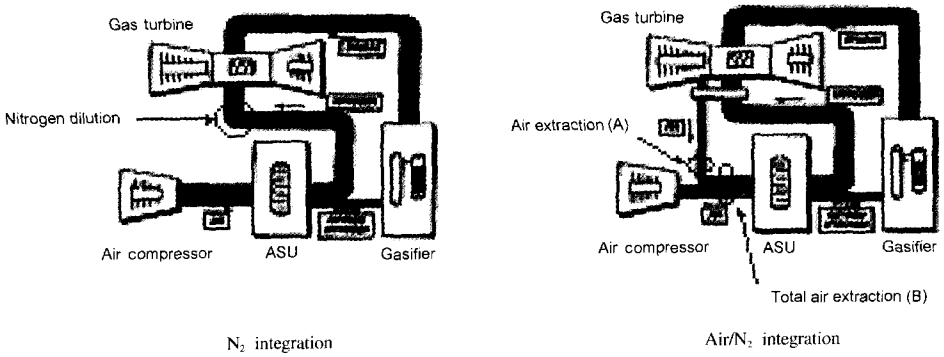
Table 2의 연료를 사용하는 IGCC 가스터빈으로는 General Electric 사의 MS7000IFA 모델을 사용하였고, 이 때 가스터빈은 공기분리장치(ASU)와 연계되어있으며, Fig. 2는 가스터빈과 ASU 간의 연계관계를 도시하고 있다.

Fig. 2에서 보여지는 바와 같이, 질소연계(N_2 integration)는 ASU에서 분리된 질소를 가스터빈 연소기의 희석제로 사용하는 것이며, 공기/질소연계(air/N_2 integration)는 가스터빈 압축기에서 추출된 공기를 ASU에서 산소와 질소로 분리한 후, 산소는 중잔사유 가스화를 위한 산화제로 질소는 가스터빈 연소기에서 발생하는 NOx 제어를 위해 연소기로 재유입되어 희석제로 사용된다는 점이 다르다. 이러한 ASU 연계설계방식에 있어서, ASU에서 소요되는 전체 공기량(B) 중에서 가스터빈 압축기에서 추출되는 양(A)의 비율을 공기 추출비(air extraction ratio)라하고, 이 변수는 IGCC 플랜트 성능을 좌우하는 주요한 인자로 작용한다. 참고로 본 연구에서 사용한 ASU는 2단 증류탑 공정으로서, ASU에 필요한 공기 중 가스터빈으로부터 추출되지 않는 공기는 ASU에 별도로 설치된 공기 압축기에 의해 공급되는 것으로 가정하였다.

또한 공기추출 및 질소희석에 의해 IGCC용 가스터빈은 탈설계점 작동이 현저하게 나타나는 것으로 보고되고 있으며[6], 본 연구는 이러한 탈설계점 작동 효과를 고려하기 위해, 공정 설계시 가스터빈 팽창기의 질식조건과 압축기의 성능곡선을 고려하였다[7]. 더 나아가, 가스터빈 연소기의 해석방법에 Lefevre의 semianalytical 모델을 결합하여 NOx 배출량을 예측할 수 있도록 하였다[8].

가스터빈의 폐열을 회수하기 위한 HRSG는 저압, 중압, 고압의 3가지 압력의 증기를 생산할 수 있도록 배기가스의 흐름 경로에 따라 열교환기를 다음과 같이 배열하였고,

HP superheater → reheater → HP evaporator



N_2 integration　　Air/N_2 integration

Fig. 2. Schematic diagram of the gas turbine integrated with ASU.

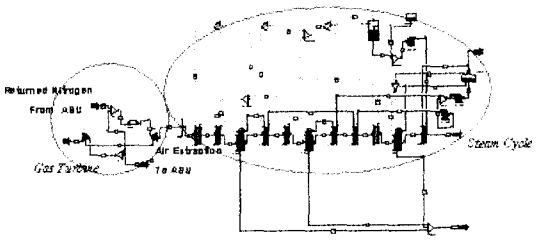


Fig. 3. Simulation model of heavy residue oil IGCC power block.

→ HP economizer#2 → IP superheater
→ IP evaporator → IP economizer
→ HP economizer#1 → LP superheater
→ LP evaporator → Feed water heater

증기터빈은 재열방식을 채택하였으며 HRSG 배기가스의 배출온도는 최하 100℃로 제한하였다. 그리고 이러한 ASU와 연계된 가스터빈-증기사이클 복합발전계통의 설계는 플랜트 전용 해석 코드인 GateCycle을 이용하였으며, 이때 전산 모사를 위한 모델이 Fig. 3에 도시되어 있다.

참고로, 본 방법에 의해 예측된 가스터빈 및 증기사이클의 성능 모사결과는 시험결과와 5% 미만에서 잘 일치하였고, 또한 NOx 해석방법도 약 10% 범위 내에서 정확한 예측결과를 가져다준다[7].

3. 해석 결과 및 검토

Figs. 4-5는 질소희석이 없는 경우와 있는 경우에 대

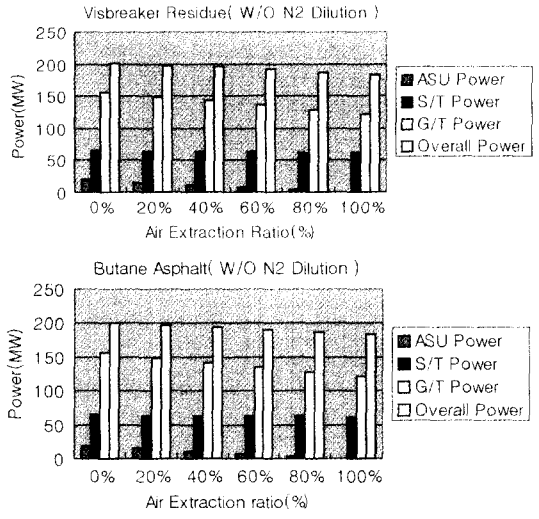


Fig. 4. Power output & consumption of heavy residue oil IGCC plant without N_2 dilution.

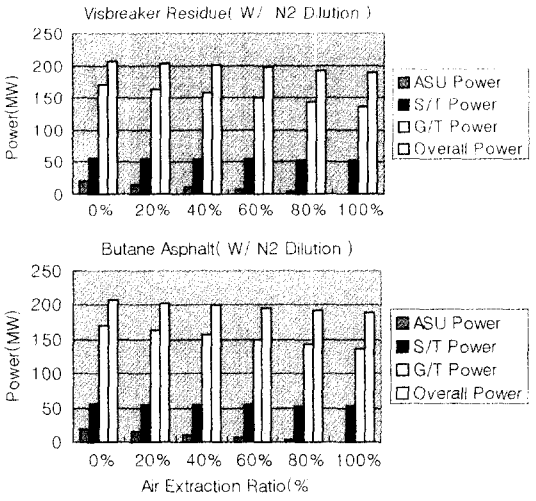


Fig. 5. Power output & consumption of heavy residue oil IGCC plant with N_2 dilution.

한 중잔사유 가스화 복합 플랜트들의 출력 모사결과들을 보여주고 있다. Fig. 4에서 볼 수 있듯이, 공기 추출비의 증가는 가스터빈을 통과하는 공기의 양을 감소시켜 가스터빈의 출력 감소를 현저하게 수반하며, 이로 인해 전체 플랜트의 출력도 저하되는 경향을 보인다. 또한, Fig. 5에서 보여지듯이, ASU에서 재유입되는 질소의 희석은 가스터빈으로 유입되는 질량의 증가를 가져와 가스터빈 출력 증가를 수반하나, 반면에 가스터빈의 배기가스 온도 저하와 그로 인한 증기터빈 출력 감소를 야기시킨다. 그러나, 이러한 증기터빈 출력 저하에도 불구하고, 가스터빈 출력 향상으로 인해 전체적으로는 질

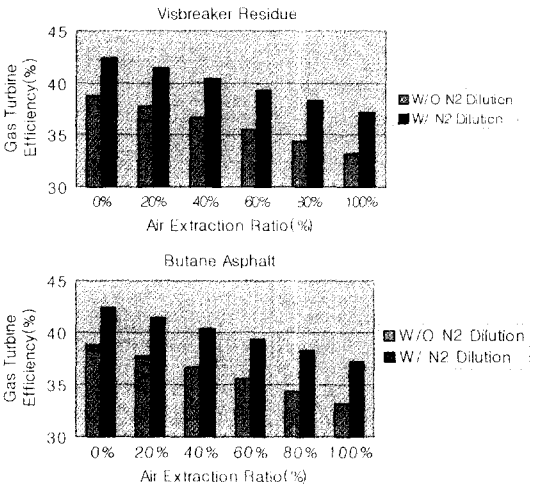


Fig. 6. Gas turbine efficiency of IGCC power plant.

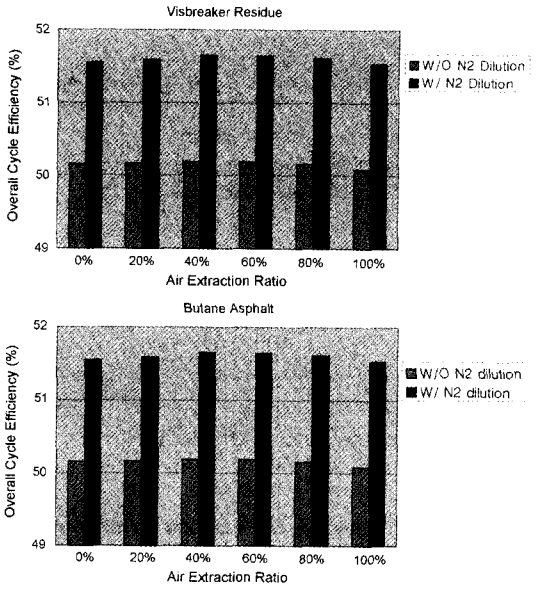


Fig. 7. Overall cycle efficiency of IGCC power plant.

소 회석이 없는 경우에 비해 약 10% 가량의 출력 향상을 가져온다. 또한 발열량이 다소 높은 Visbreaker residue 경우가 Butane Asphalt 경우에 비해 약 1.0% 미만의 출력향상을 보여준다.

Fig. 6에서 보여지듯이, 가스터빈 효율은 중잔사유의 종류에 상관없이 공기추출비의 증가에 따라 저하됨을 알 수 있으며, 이러한 예측결과는 앞서의 공기추출비 증가에 따라 출력이 감소되는 결과로부터 유추 가능하다. 천연가스를 사용하는 가스터빈의 효율이 36% 수준임을 감안하면[7], 질소희석이 있는 IGCC 가스터빈의 경우 천연가스의 경우에 비해 우수한 효율을 보임을 알 수 있다.

Fig. 7은 IGCC 복합발전계통의 효율을 나타내고 있으며, IGCC 복합발전계통의 효율은 질소희석이 없는 경우에는 공기 추출비 20% 조건에서 가장 높으며, 질소희석이 있는 경우에는 공기 추출비 40~60% 범위 내에서 가장 최적의 상태임을 알 수 있다. 또한 중잔사유의 발열량이 거의 같은 관계로 사이클 효율도 큰 차이를 보이지 않는다. 참고로 본 연구에서 예측한 IGCC 사이클의 전체 효율은 IGCC 플랜트의 발전계통에 대한 값이므로, 가스화 및 정제공정과 같은 화학 공정의 운전에 필요한 보조 부하들을 고려한 전체 IGCC 효율은 본 방법의 예측결과들에 비해 다소 떨어질 것으로 예상된다.

Fig. 8은 IGCC 플랜트의 가스터빈 작동 압력비가 공기추출비 및 질소희석에 따라 어떻게 변화하는지를 보여주고 있으며, 이러한 압력비의 변화는 IGCC용 가스터빈의 탈설계점 작동에 기인한다. 가스터빈에 천연가스 연료를 사용하는 경우의 설계 압력비가 15 인점을 감안하면, IGCC 용 가스터빈의 경우 질소희석이 있고 공기추출비가 있는 경우 압력비가 설계치에 비해 크게 상승함을 볼 수 있다. 그러나 질소희석이 없고 공기추출비가 있는 경우에는 오히려 압력비가 설계치에 비해 감소함을 알 수 있다.

Fig. 8에서 예견되었듯이, 공기추출비의 감소와 질소희석으로 인해 가스터빈의 작동 압력이 상승되고, 이로 인해 써지 마진도 줄어드는 현상이 Fig. 9에서 나타나 있다. 특히 질소희석이 있는 경우가 없는 경우에 비해, 써

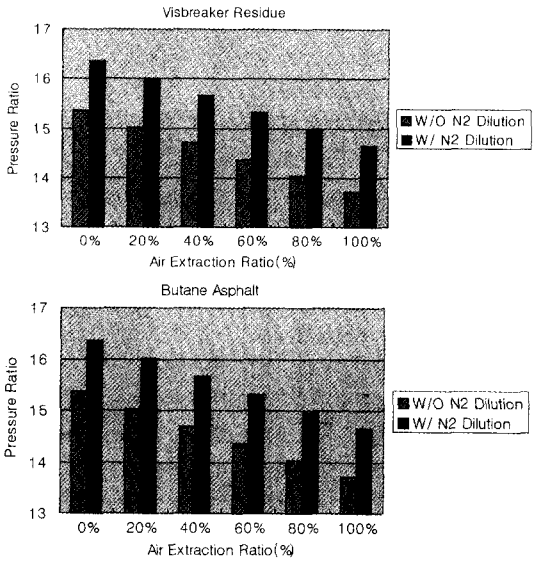


Fig. 8. Pressure ratio of IGCC power plant.

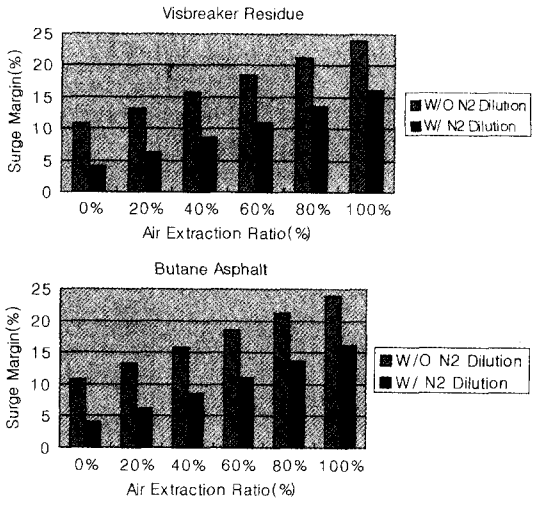


Fig. 9. Surge margin of IGCC power plant.

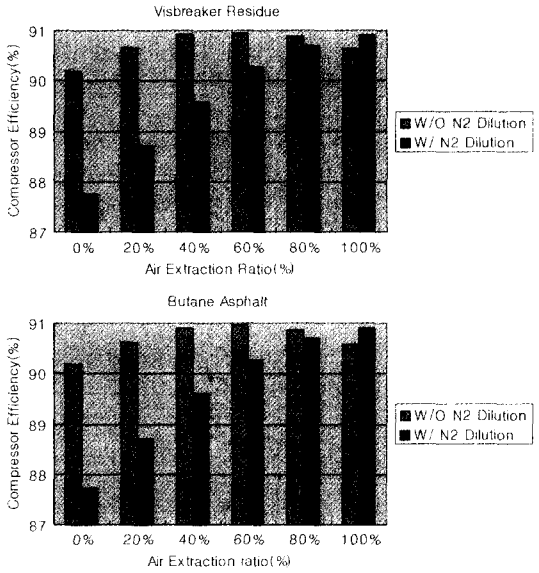


Fig. 10. Gas turbine compressor efficiency of IGCC power plant.

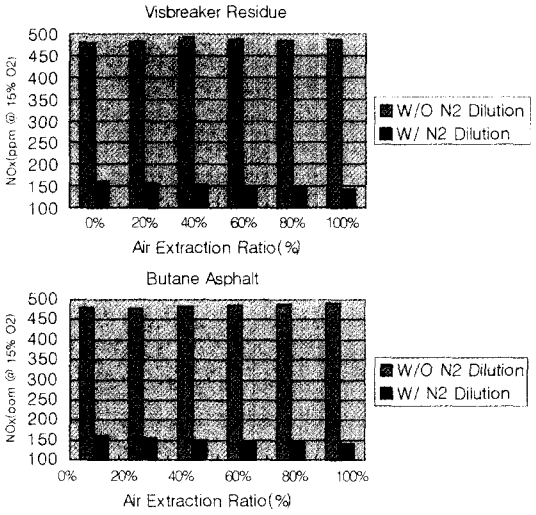


Fig. 11. NOx emission of IGCC power plant.

지 마진이 대폭적으로 줄어들어 최소 3%까지 근접함을 볼 수 있다. 일반적으로 가스터빈의 써지 마진이 15% 근방임을 감안하면, IGCC용 가스터빈의 경우 질소희석과 낮은 공기추출비의 경우 매우 불안한 운전특성을 가짐을 알 수 있다.

Fig. 10은 공기 추출비 및 질소희석에 의한 가스터빈 압축기의 효율 변화를 보여주고 있으며, 앞서 언급한 바와 같이 IGCC용 가스터빈 압축기의 경우 유입공기량 감소로 인해 압력비의 증가와 더불어 효율의 변화도 일어나게 된다. Fig. 10에서 보여지듯이, 질소희석이 없는 경우 압축기 효율은 공기추출비가 40~60%에서 가장 높은 값을 나타내나, 질소희석이 있는 경우는 공기추출비가 줄어들수록 효율도 3% 가량 급격히 저하되는 경향을 보인다. 이러한 결과는 질소희석이 없는 경우는 가스터빈 압축기의 운전조건이 설계점(또는 최대효율점)을 중심으로 그 근방에서 유지되나, 반면에 질소희석이 있는 경우는 가스터빈 압축기의 유입 공기량이 공기추출비가 줄어들수록 설계점으로부터 적은 범위에 머물게 되므로, 이로 인해 압축기의 효율도 급격히 저하되는 경향을 보이게 되는 것이다[6][7].

Fig. 11은 NOx 배출량 특성과 질소 희석을 통한 NOx 저감 효과를 보여주고 있다. 질소희석이 없는 경우, 공기추출비에 상관없이, NOx 배출량이 약 500 ppm(@15% O_2) 수준임을 알 수 있으며, 이 값은 천연가스를 확산형 연소기에서 태우는 경우의 200 ppm[9]에 비해 매우 높은 수치이다. 그러나, 질소희석이 이루어진 경우 NOx 발생량이 중잔사유의 경우 150~170 ppm 수준으로 급격히 저감되며, 거의 천연가스와 동등한 NOx 발생특성을 유지하게 된다. 또한 공기추출비는 질소희석에 비해 NOx 저감에 큰 영향을 미치지는 않음을 알 수 있었다. 이러한 결과는 공기 추출비의 증가는 연소기의 연소온도 증가를 수반하며 이로 인해 NOx 증가 요인이 발생하나, 공기 추출비의 증가로 인한 연소기 작동 압력의 감소는 오히려 NOx 저감효과로 작용하여 두 효과가 서로 상쇄되기 때문으로 판단된다[8].

또한 Fig. 11로부터, 중잔사유의 종류에 따라 동일한 공기추출비 및 질소희석 조건에 대해서도, NOx 발생량이 다소 차이가 남을 볼 수 있다. 이러한 결과는 두가지 중잔사유 가스의 조건이 거의 동일하여 가스터빈 연소온도, 압력 등에도 큰 차이가 없어, 출력과 효율 같은 플랜트 성능변수들에는 그리 큰 영향을 미치지 않으나, 이러한 온도와 압력의 미세한 차이로 인해 NOx 발생량에는 수십 ppm 이상의 차이를 가져올 수 있음을 의미한다.

4. 결 론

정유공장 중잔사유의 재활용을 위한 가스화 복합발전 계통의 공정 설계 및 모사 기법을 제안하였고, 본 방법을 중잔사유의 일종인 Visbreaker residue와 Butane asphalt에 대해 적용하여 보았다. 예측결과로부터, 공기추출비의 감소와 질소희석을 통해 복합 플랜트 출력의 향상이 가능하며, 전체 발전계통효율은 질소 희석이 없는 경우에는 약 20% 공기 추출비 조건에서, 질소 희석

이 있는 경우에는 40~60% 공기 추출비 범위에서 최적의 값을 보였다. 더 나아가, 낮은 공기 추출비와 질소희석이 동시에 이루어지도록 IGCC 플랜트를 설계하는 경우에는, 가스터빈의 압력비 상승과 더불어 써지와 같은 운전 불안정성이 유발될 가능성이 높아짐을 알 수 있다. 또한 서로 다른 중잔사유를 사용하는 경우에도, 발생된 가스의 조성 및 발열량이 유사한 경우에는 출력, 효율, 압력비, 써지마진 등과 같은 성능변수들에 큰 영향을 주지 않았다.

NOx 발생량은 질소희석이 없는 경우에는 천연가스의 경우에 비교적 많은 양을 보이나, 질소희석을 통해 약 60% 가량의 저감이 가능하였다. 또한 공기 추출비는 NOx 발생 및 저감에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 고등기술연구원과 수원대학교 환경청정기술연구센터의 지원에 의한 것입니다. 이에 관계자들께 감사드립니다.

참고문헌

1. Schulman, B.L. and Dickenson, R.L.: ACS Spring Nat'l Meeting Procd., 463 (1993).
2. Kwon, S.H. *et al.*: "Hydrogen Production Alternatives in an IGCC Plant", Hydrocarbon Processing, 73-76 (1999).
3. Liebner, W. and Hauser, N.: "Optimizing/Costing Study for a 500 MW IGCC Power Plant Based on the Shell Gasification Process", EPRI Gasification Technology Conference, 1-16 (1996).
4. 이승종 외: "중잔유의 500MW 급 가스화 복합발전 적용 성능 평가", HWAHAK KONGHAK, 37, 775-781 (1999).
5. 이승종 외: "공정개발급 석탄가스화 복합발전플랜트의 성능평가", HWAHAK KONGHAK, 37, 47-55 (1999).
6. 이 찬 외: "석탄가스화 복합발전용 가스터빈의 성능평가", 유체기계저널, 2, 7-14 (1999).
7. 이 찬, 윤용승: "중발열량 석탄가스를 사용하는 복합발전 사이클의 성능 및 NOx 배출 특성", 한국에너지공학회지, 295-302 (2000).
8. Lefebvre, A.H.: Gas Turbine Combustion, Hemisphere Publishing Co. (1983).
9. Claey, J.P. *et al.*: "Combustion System Performance and Field Test Results of MS7001F Gas Turbine", J. of Eng. for Gas Turbine and Power, 115, 537-545 (1993).